

УДК 004.061

А. Ф. Верлань*, д-р техн. наук, профессор,
С. А. Положаєнко**, д-р техн. наук, профессор,
А. А. Дячук***, канд. техн. наук

*Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН України, г. Київ,

**Одеський національний політехнічний університет, г. Одеса,

***ГУ «Інститут економіки і прогнозування

НАН України», г. Київ

ЛОКАЛИЗАЦИЯ НЕИСПРАВНЫХ ПОДСХЕМ В ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ СХЕМАХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Диагностирование работоспособного состояния электронных устройств (ЭУ) различного назначения представляет собой важную техническую задачу. В постановочном плане и в процессе реализации данная задача существенно осложняется необходимостью получения оценок состояния диагностируемого объекта непосредственно в ходе режимов работы ЭУ. Особенно актуально указанный аспект решения задачи диагностики стоит для устройств, которые не подлежат выводу из эксплуатации. Например, это относится к элементам аварийной сигнализации, нерезервированным компонентам диспетчерского управления, а также устройствам, работающим в автономном режиме. В работе показана возможность практического применения метода обучающих и проверочных характеристик в задачах локализации неисправных подсхем ЭУ как в случае линейного, так и нелинейного исполнения последних.

Ключевые слова: *диагностирование, локализация неисправностей, линейные схемы, нелинейные схемы, неисправные подсхемы, гипотезы о состоянии ЭУ, обучающие сигналы, проверочные сигналы.*

Введение. Действенным путем локализации неисправных подсхем в ЭУ может рассматриваться *метод обучающих и проверочных характеристик* (метод ОПХ) [1, 2], суть которого состоит в следующем.

Пусть исправная система описывается зависимостью:

$$y^* = F^*(u), \quad (1)$$

где $y^* = (y_1^*, \dots, y_n^*)^T$ — вектор выходных сигналов, $u = (u_1, \dots, u_m)^T$ — вектор входных сигналов, F^* — некоторый оператор.

Также пусть в системе выделена подсистема S_i , описание которой в исправном состоянии имеет вид

$$z_i^* = f_i^*(v_i), \quad (2)$$

где z_i^* — вектор выходных сигналов размерности n_i , v_i — вектор входных сигналов размерности m_i , f_i^* — оператор подсистемы S_i .

Предполагается, что неисправности возможны в одной подсистеме, т. е. допускаются только однократные неисправности. Пусть неисправная подсистема S_i описывается неизвестной зависимостью, где z_i, v_i — векторы входных и выходных сигналов, соответственно, имеющие размерность n_i и m_i .

Пусть установлено, что система неисправна. Требуется, располагая входными u и выходными y сигналами неисправной системы и описанием исправной системы, определить неисправную подсистему.

Поиск неисправной подсистемы с помощью метода ОПХ проводится путем поочередного рассмотрения гипотез H_i о неисправности подсистемы S_i . Если какая-то гипотеза H_i принимается, то подсистема S_i считается неисправной.

Для проверки гипотезы H_i выделяются *обучающее* $N_{об}$ и *проверочное* $N_{пр}$ множества контролируемых сигналов, удовлетворяющие условию:

$$N_{об} \cap N_{пр} \neq \emptyset. \quad (3)$$

Метод ОПХ основан на получении оценок входного \hat{v}_i и выходного \hat{z}_i сигналов проверяемой подсистемы, а алгоритмы диагностирования существенно зависят от диагностических свойств подсистемы. В [3] рассматриваются различные свойства подсистем: независимая наблюдаемость; независимая управляемость; независимая наблюдаемость управляемость. Обычно [3] ограничиваются рассмотрением свойства независимой наблюдаемости подсистем и его применения для диагностирования подсистем ЭУ.

При этом неисправная система представляется состоящей из двух подсистем: из неисправной подсистемы S_i и исправной подсистемы. Исправная подсистема описывается как

$$\begin{aligned} y &= A_i(u, z_i), \\ v_i &= B_i(u, z_i). \end{aligned} \quad (4)$$

и представляет собой исправную часть системы.

Покажем возможность использования метода ОПХ для локализации неисправных подсистем в линейных и нелинейных схемах ЭУ.

Основная часть. Рассмотрим особенности применения метода ОПХ в задачах диагностики *линейных* схем ЭУ.

Покажем, что применение метода ОПХ для линейных систем и цепей сводится к проверке совместности системы линейных алгебраических уравнений относительно изменений контролируемых сигналов.

Это, в свою очередь, дает возможность в случае линейных цепей для локализации неисправных подсхем применить метод инвариант, представляющий собой своеобразный словарь неисправностей [4].

Пусть дана цепь S , в которой выделена некоторая подсхема S_i (рис. 1), для которой необходимо проверить гипотезу H_i , заключающуюся в том, что S_i содержит в себе все неисправности цепи S .

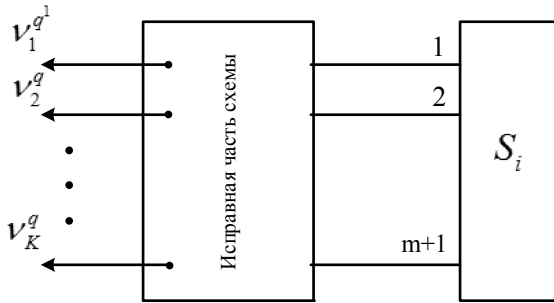


Рис. 1. Цепь S с выделенной подсхемой S_i

Обозначим $V^\partial = [V_1^\partial V_2^\partial \dots V_k^\partial]^T$ — вектор доступных для измерения напряжений, $J^{S_i} = [J_1^{S_i} J_2^{S_i} \dots J_m^{S_i}]^T$ — вектор выходных сигналов подсхемы S_i , состоящий из линейно независимых токов, потребляемых подсхемой через полюсные узлы.

Таким образом, рассматриваемую цепь можно представить в виде, изображенном на рис. 2.

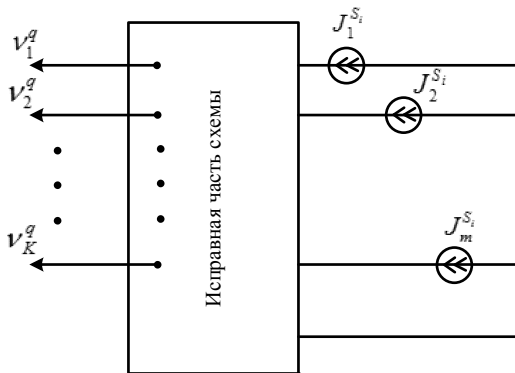


Рис. 2. Представление цепи в виде доступных для измерения напряжений и вектора линейно независимых выходных токов, потребляемых подсхемой через полюсные узлы

Определение оценки величин выходных сигналов подсхемы S_i означает определение значения источников тока $J_1^{S_i}, \dots, J_m^{S_i}$, замещающих эту подсхему.

Запишем уравнение узловых напряжений для исправной цепи с выделенной подсхемой S_i

$$Y^i V = J, \quad (5)$$

где входящие в (5) величины представляют собой $Y^i - n \times n$ — матрицу узловых проводимостей исправной части цепи, $V - n \times 1$ — вектор узловых напряжений, $J - n \times 1$ — вектор независимых источников тока.

Проведем разбиение векторов:

$$\begin{aligned} V &= \left[\left(V^{\partial} \right)^T : \left(V^H \right)^T \right]^T, \\ J &= \left[\left(J^{S_i} \right)^T : \left(J^0 \right)^T \right]^T, \end{aligned} \quad (6)$$

где входящие в (6) величины представляют собой $V^{\partial} - k \times 1$ — вектор доступных напряжений, $V^H - (n - k) \times 1$ — вектор недоступных для измерения напряжений, $J^0 - (n - m) \times 1$ — вектор независимых источников тока, включенных в исправную часть схемы.

Неисправность в подсхеме S_i скажется на значениях источников тока J^{S_i} и узловых напряжениях V , а уравнение (5) для исправной цепи примет вид

$$Y^i V^f = J^f, \quad (7)$$

где входящие в (7) величины представляют собой $V^f - n \times 1$ — вектор узловых напряжений в неисправной цепи, $J^f - n \times 1$ — вектор независимых источников тока.

С учетом разбиения (6) имеем:

$$\begin{aligned} V^f &= \left[\left(V^{\partial f} \right)^T : \left(V^{Hf} \right)^T \right]^T, \\ J^f &= \left[\left(J^{S_i f} \right)^T : \left(J^0 \right)^T \right]^T. \end{aligned} \quad (8)$$

Из (5) и (7) получим

$$Y^i \Delta V = \Delta J, \quad (9)$$

где

$$\Delta V = V - V^f = \begin{bmatrix} \Delta V^\partial \\ \Delta V^H \end{bmatrix},$$

$$\Delta J = J - J^f = \begin{bmatrix} \Delta J^{S_i} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Предполагая, что $Z^i = (Y^i)^{-1}$ существует, из (9) получаем

$$\Delta V = Z^i \Delta J, \quad (10)$$

а (10) можно представить в виде:

$$\begin{bmatrix} \Delta V^\partial \\ \Delta V^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}^i & Z_{12}^i \\ Z_{21}^i & Z_{22}^i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta J^{S_i} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где $Z_{11}^i, Z_{12}^i, Z_{21}^i, Z_{22}^i$ — блоки размерности $k \times m, k \times (n-m), (n-k) \times m, (n-k) \times (n-m)$, соответственно.

Будем считать, что $k > m$. Уравнение (11) перепишем в виде

$$\Delta V^\partial = Z_{11}^i \Delta J^{S_i}, \quad (12)$$

$$\Delta V^H = Z_{21}^i \Delta J^{S_i}. \quad (13)$$

Уравнение (13) связывает выходные сигналы подсхемы S_i и измеримые напряжения. Следовательно, оно может быть использовано для анализа различимости, поскольку (13) является уравнением вида (4) для линейных электрических цепей. Следовательно, при гипотезе H_i подсхемы S_i и S_j будут независимо наблюдаемы тогда и только тогда, когда

$$\text{rang} \begin{bmatrix} Z_{11}^i & Z_{11}^j \end{bmatrix} = \text{rang} \begin{bmatrix} Z_{11}^i \end{bmatrix} + \text{rang} \begin{bmatrix} Z_{11}^j \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Если подсхема S_i наблюдаема, т. е.

$$\text{rang} \begin{bmatrix} Z_{11}^i \end{bmatrix} = m,$$

$$\text{то } \text{rang} \begin{bmatrix} Z_{11}^i & Z_{11}^j \end{bmatrix} = \text{rang} \begin{bmatrix} Z_{11}^j \end{bmatrix} + m. \quad (15)$$

Из (12) можно получить соотношение между изменениями доступных напряжений инвариантное относительно вида неисправности в подсхеме S_i . Для этого определим ΔJ^{S_i} . Учитывая, что $k > m$, т.е. система (12) переопределена, получим

$$\Delta J^{S_i} = \left[\begin{pmatrix} Z_{11}^i \end{pmatrix}^T Z_{11}^i \right]^{-1} \begin{pmatrix} Z_{11}^i \end{pmatrix}^T \Delta V^\partial. \quad (16)$$

Умножая обе части (16) на Z_{11}^i , и учитывая (12), имеем

$$Z_{11}^i \left\{ Z_{11}^i \left[\left(Z_{11}^i \right)^T Z_{11}^i \right]^{-1} \left(Z_{11}^i \right)^T - E \right\} \Delta J^{S_i} = 0, \quad (17)$$

где E — единичная матрица.

Выражение (17) дает соотношение между изменениями контролируемых напряжений при неисправности i -й подсхемы, и совокупность таких соотношений можно использовать в качестве словаря неисправностей.

Для линейных цепей переменного тока с синусоидальной формой сигналов коэффициенты и переменные в (17) являются величинами комплексными. Поэтому проверка соотношения (17) проводится как для действительной, так и мнимой частей.

Далее покажем возможность локализации неисправных подсхем в *нелинейных* схемах ЭУ.

Особенности применение метода ОПХ для локализации неисправных подсхем в нелинейных цепях постоянного тока заключается в следующем.

1. Множество доступных узлов разбивается на две группы: обучающие узлы $N_{об}$ и проверочные узлы $N_{пр}$; $V^{об}$ и $V^{пр}$ — соответственно напряжения, измеряемые в этих узлах, причем

$$N_{об} \cap N_{пр} \neq N_{об}. \quad (18)$$

Кроме того, количество узлов в $N_{об}$ должно быть достаточным для определения оценки выходных сигналов проверяемых подсхем, т.е.

$$N_{об} \geq m_i,$$

где m_i — количество независимых переменных, выбранных в качестве выходных сигналов m_{i+1} -полюсника.

2. Поочередно проверяются гипотезы H_i , представляющие собой предположения о том, что подсхема S_i содержит в себе все неисправности. Проверка гипотезы H_i заключается в том, что по результатам измерения $V^{об}$ определяются оценки выходных сигналов подсхемы \hat{Y}_i .

3. Используя оценку выходных сигналов подсхемы \hat{Y}_i как входные сигналы исправной части схемы, подключенные к ней вместо проверяемой подсхемы S_i , определяются оценки напряжения в проверочных узлах $\hat{V}^{пр}$.

Если

$$\hat{V}^{пр} = \hat{Y}_i, \quad (19)$$

то гипотеза принимается, т.е. подсхема S_i считается неисправной. В противном случае гипотеза H_i отбрасывается, и переходят к проверке очередной гипотезы H_{i+1} .

В случае нелинейных цепей переменного тока измерение обучающих и проверочных характеристик осуществляется на интервале $[0, T]$, можно получить оценку выходных сигналов проверяемой подсхемы \hat{Y}_i на том же интервале $[0, T]$. В качестве критерия принятия гипотезы можно принять условие:

$$\sum_{j \in N^{об}} \int_0^T \left\{ \left[V_j^{np}(t) - \hat{V}_j^{np}(t) \right] \times \left[V_j^{np}(t) - \hat{V}_j^{np}(t) \right]^m \right\} dt \leq \varepsilon, \quad (20)$$

где ε — малая величина, определяемая шумами измерений.

В процессе проверки может быть принято несколько гипотез. Это означает, что в данном режиме эти подсхемы оказались неразличимыми. В этом случае можно поступить следующим образом:

- принять все эти подсхемы неисправными;
- изменить набор контрольных точек и провести проверку этих подсхем повторно;
- использовать другое разбиение проверяемой схемы на подсхемы и провести повторную проверку;
- изменить как набор контрольных точек, так и разбиение проверяемой схемы на подсхемы и провести повторную проверку.

Если неразличимые подсхемы пересекаются, т. е. имеют общие элементы, то следует проверить исправность общей части этих подсхем. В частности, если одна из подсхем полностью входит в другую, то новые контрольные узлы следует выбрать так, чтобы можно было проверить исправность внутренней подсхемы.

Для проверки гипотез кроме основного критерия (19), (20) можно использовать еще и дополнительные условия, основанные на том, что на выходные сигналы подсхем накладываются определенные ограничения, которые ни при каких неисправностях не могут быть нарушены. Например, величина напряжения ни в одном узле проверяемой схемы ЭУ не может превысить величины напряжения источника питания. Если через D_y^i обозначать множество допустимых значений для выходного сигнала подсхемы S_i , то дополнительный критерий можно выразить следующим образом:

$$\hat{Y}_i \in D_y^i. \quad (21)$$

С помощью (21) в ряде случаев удается различать даже те подсхемы, которые не являются независимо наблюдаемыми.

Заключение. Метод ОПХ в задачах диагностирования ЭУ позволяет локализовать неисправные подсистемы, независимо от вида возникших неисправностей. После проведения анализа различимости подсистем, результаты проверки каждой гипотезы являются надежными, т.е. не требуют хранения и анализа результатов проверки других гипотез. Важным преимуществом метода ОПХ является использование в качестве контролируемых сигналов только узловых напряжений и не требует обязательного измерения токов.

Список использованной литературы:

1. Верлань А. А. Локализация неисправных электронных подсистем методом обучающих и проверочных характеристик / А. А. Верлань, С. А. Положаенко, И. Х. Осман // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Техн. науки : зб. наук. праць. — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Поділ. нац. ун-т ім. І. Огієнка, 2008. — Вип. 1. — С. 140–144.
2. Верлань А. А. Диагностирование сложных электронных схем на основе метода обучающих и проверочных характеристик / А. А. Верлань, Ю. Стертен // Електротехнічні та комп'ютерні системи. — 2015. — № 19. — С. 272–275. — Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2015_19_60.
3. Верлань А. А. Способы локализации и идентификации элементов электрических устройств в задачах диагностики / А. А. Верлань // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Техн. науки : зб. наук. праць. — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Поділ. нац. ун-т ім. І. Огієнка, 2012. — Вип. 7. — С. 20–27.
4. Шухат Б. А. Модификация метода неразрушающего поэлементного диагностирования линейных пассивных цепей / Б. А. Шухат // Тез. докл. науч.-техн. конф. «Диагностическое обеспечение РЭА на этапах проектирования и производства». — Л. : Судостроение, 1990. — С. 91.

Diagnosing the operational state of electronic devices (ED) for various purposes is an important technical task. In the production plan and in the process of implementation, this task is significantly complicated by the need to obtain estimates of the state of the diagnosed object directly in the course of the operation of the ED. Especially relevant, this aspect of solving the diagnostic problem is for devices that are not subject to decommissioning. For example, this applies to alarm elements, non-redundant components of dispatch control, and to devices operating in the autonomous mode. The paper shows the possibility of practical application of the method of training and verification characteristics in problems of localization of faulty ECU sub-circuits both in the case of linear and nonlinear execution of the latter.

Keywords: *diagnostics, fault location, linear circuits, nonlinear circuits, faulty sub circuits, hypotheses about the state of the ED, training signals, test signals.*

Отримано: 16.10.2017